

# MBBR 工艺在采用氧化沟工艺的污水厂提标改造中的应用

王晓康, 杨欣, 边靖, 徐保祥

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 台州黄岩江口污水一期工程提标改造规模为  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 本次工程将出水标准从《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 二级标准提升至《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准。提标核心目标为强化一期氧化沟的硝化、反硝化脱氮能力。在综合分析出水标准要求、氧化沟流态、硝化及反硝化过程的环境要求等因素后, 确定氧化沟改造采用 MBBR 工艺, 在池内采取了重新划分缺氧、好氧功能区, 在好氧区投加填料, 调整内回流泵参数, 更改曝气方式等工程措施。工程运行结果表明, 改造后运行成本降低, MBBR 工艺能够达到设计出水标准, 且对水质、水量冲击负荷具有良好的适应能力。

**关键词:** 提标改造; 氧化沟; MBBR

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)06-0055-05

## Application of MBBR Process in Upgrading and Reconstruction of Wastewater Treatment Plant (WWTP) with Oxidation Ditch Process

WANG Xiao-kang, YANG Xin, BIAN Jing, XU Bao-xiang

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The design capacity of the upgrading and reconstruction project of the first phase of Huangyan Jiangkou wastewater treatment plant (WWTP) in Taizhou was  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . The effluent standard of this project was required to be enhanced from the second level of *Integrated Wastewater Discharge Standard* (GB 8978 - 1996) to the first level A standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 - 2002). The target of the upgrading and reconstruction project was to strengthen the nitrification and denitrification performance of the oxidation ditch in the first phase project. After the comprehensive analysis of the factors such as effluent standards, oxidation ditch flow state and the environmental requirements of nitrification and denitrification process, MBBR process was adopted for upgrading and reconstruction of the oxidation ditch process, engineering measures such as redividing the anoxic and oxic functional area, adding filler in aerobic area, adjusting the parameters of internal reflux pump parameters and changing aeration mode were adopted. The engineering operation results showed that the MBBR process could meet the design effluent standard and had good adaptability to the impact of water quality and water quantity.

**Key words:** upgrading and reconstruction; oxidation ditch; MBBR

### 1 工程概况

#### 1.1 污水厂现状

台州黄岩江口污水厂一期工程于 2001 年 12 月投入运行, 设计规模为  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。主体处理工艺

为 Carrousel 2000 型氧化沟工艺。出水水质执行国标《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 中的二级标准。

江口污水厂在改造前进水主要来自城区泵站输

送的市政污水及开发区泵站输送的重污染工业废水,其中重污染工业废水以医化、食品加工、印染、塑料制品等废水为主,水量比例约为20%~30%,工业废水量多年来较稳定。

根据江口污水处理厂运行监测数据,进厂污水量总体增加的趋势较为明显,至2014年日均污水量已至 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,最高日进水量达 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上。

另根据浙江省委文件要求:到2017年,所有污水处理厂执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。

故需对江口污水厂进行提标改造。

## 1.2 工程设计难点

### ① 实际进水水质超过原设计水质

因江口开发区内部分医化企业、印染企业规模的扩大,目前工业废水实际进水浓度已高于设计值,氧化沟内原有立式表曝机已无法满足供氧需求。

### ② 脱氮能力不足

现状 Carrousel 2000 型氧化沟脱氮能力有限,经过核算,生物脱氮能力无法满足要求。

### ③ 工业废水的冲击负荷

工业废水 COD 浓度为  $1\,000 \sim 3\,000 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度为  $30 \sim 70 \text{ mg/L}$ , TN 浓度为  $50 \sim 75 \text{ mg/L}$ 。由于厂内未设置污水调节池等构筑物,工业废水与市政污水混合后仅经常规预处理(粗、细格栅+旋流沉砂池)后即进入氧化沟,为污水厂生物处理系统带来较大的冲击和处理负担。

### ④ 生物处理系统遭到抑制

化工、印染等工业废水存在一定的有毒难生物降解污染物,使氧化沟中硝化及反硝化细菌活性受到严重抑制,造成出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 难以达标,甚至高于进水浓度。

### ⑤ 厂区内用地面积有限

现状厂区内仅在围墙内东北角有预留用地,用地较为紧张,且厂区内现状管道较多。

## 2 提标工程设计水质

### 2.1 设计进、出水水质

提标工程将出水标准从《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)二级标准提升至《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。

设计进、出水水质如表1所示。

表1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 项 目   | COD | BOD <sub>5</sub> | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | TN | SS  | TP  |
|-------|-----|------------------|----------------------------|----|-----|-----|
| 进水    | 600 | 250              | 40                         | 60 | 200 | 5   |
| 二沉出水  | 65  | 10               | 5(8)                       | 15 | 20  | 1.5 |
| 出水    | 50  | 10               | 5(8)                       | 15 | 10  | 0.5 |
| 原设计进水 | 530 | 210              | 45                         | 55 | 150 | —   |
| 原设计出水 | 120 | 30               | 15                         | —  | 30  | —   |

## 2.2 碱度复核

根据微生物硝化与反硝化脱氮作用的反应原理,硝化菌对于 pH 的变化十分敏感,应当在水中保持足够的碱度,以保证对在反应过程中 pH 值的变化,起到缓冲的作用,因此应根据进水水质对污水中碱度进行核算。根据经验,生物池出水碱度不应低于  $70 \text{ mg/L}$ ,并按以下公式计算:

$$\text{ALK}_e = \text{ALK}_0 - 7.1N_h + 3.5N_o + 0.1(S_0 - S_e) \geq 70 \text{ mg/L}^{[1]} \quad (1)$$

式中  $\text{ALK}_e$ 、 $\text{ALK}_0$ ——分别为出水、进水碱度(以  $\text{CaCO}_3$  计),  $\text{mg/L}$

$N_h$ ——硝化的氨氮浓度,  $\text{mg/L}$

$N_o$ ——反硝化的硝酸盐浓度,  $\text{mg/L}$

$70 \text{ mg/L}$ ——保持生物池内正常功能必需的碱度

根据氧化沟进水水质,为达到出水要求,污水中碱度需在  $220 \sim 250 \text{ mg/L}$ 。为验证现状污水中碱度(以  $\text{CaCO}_3$  计)能否满足生物脱氮要求,于2014年3月在江口污水厂连续5天对混合进水与终沉池出水碱度进行监测,结果见表2。可见,现状进水基本能满足碱度要求;进、出水碱度相差较小,碱度未充分利用,也证明了硝化作用受到抑制。

表2 江口污水厂进、出水碱度

Tab. 2 Alkalinity of influent and effluent of Jiangkou WWTP

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 项 目   | 进水碱度   | 出水碱度   |
|-------|--------|--------|
| 3月25日 | 290.45 | —      |
| 3月26日 | 192.07 | —      |
| 3月27日 | 230.72 | 176.14 |
| 3月28日 | 223.69 | 174.74 |
| 3月29日 | 183.87 | 156.94 |

## 3 氧化沟改造思路与方案

### 3.1 氧化沟原设计参数

江口污水厂一期工程采用 Carrousel 2000 型氧

化沟,原设计选择区(厌氧区)和独立缺氧区约占总池容的 13.5%,独立缺氧区通过内回流泵将进水与一定量(约 100%)的混合液混合,进行生物脱氮;剩余部分池容(约 86.5%)随着与表曝机的距离变化,交替形成好氧区与缺氧区,可实现对 BOD<sub>5</sub> 的去除,完成同步硝化反硝化作用。氧化沟各区容积分布见图 1,设计参数见表 3。

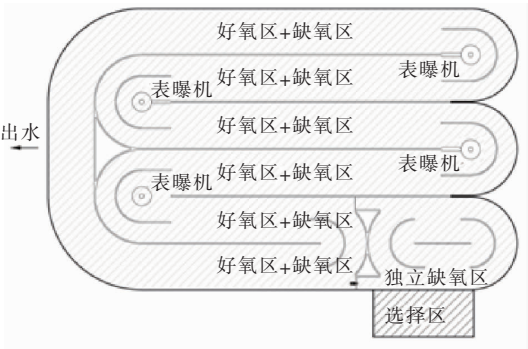


图 1 氧化沟池内原设计功能区划分  
Fig.1 Division of original design functional district in oxidation ditch

表 3 原氧化沟设计参数

Tab.3 Original design parameters of oxidation ditch

| 项 目      | 有效容<br>积/m <sup>3</sup> | 所占总容积<br>比例/% | 停留时<br>间/h |
|----------|-------------------------|---------------|------------|
| 选择区(厌氧区) | 1 815                   | 3.703         | 0.54       |
| 独立缺氧区    | 4 780                   | 9.752         | 1.43       |
| 好氧区+缺氧区  | 42 420                  | 86.545        | 12.73      |
| 总 计      | 49 015                  | 100           | 14.70      |

原设计参数: $Q_{ave}=8.0\times10^4\text{ m}^3/\text{d}=0.93\text{ m}^3/\text{s}$ ;构筑物 2 座;每座氧化沟包含 6 条廊道,单条廊道  $W=9.0\text{ m}$ , $L=64.50\text{ m}$ ;有效水深为 5.0 m;设计泥龄为 23 d;设计水温为 15℃;MLSS 为 3.5 g/L;污泥回流比为 100%~160%;内回流比为 100%。

氧化沟内主要设备:设有立式表曝机 8 台,单机功率为 160 kW;潜水推进器 8 台,单机功率为 4 kW;内回流泵 2 台,单机功率为 5.5 kW。

3.2 设计思路

提标工程采取了将工业废水分质预处理之后再与市政污水混合处理的工艺思路,增设了“工业废水调节+混合反应沉淀+水解酸化”的工艺流程,但由于工程进度的要求、征地工作所需时间等因素,首先实施氧化沟改造工程。

氧化沟改造的核心目标为强化生物硝化与反硝化脱氮能力,可通过以下两种方式实现:

① 直接采用 MBBR 工艺在现状氧化沟内进行改造,投加填料,以增加氧化沟内微生物总量,提高生物脱氮效率,适于本工程用地较紧张现状;

② 根据提标改造水质,在厂区内新建缺氧池,并将现状氧化沟全部改造为好氧区,占地面积较大。上述两种方式对比见表 4。

表 4 硝化与反硝化脱氮工艺思路比选

Tab.4 Comparison and selection of nitrification and denitrification processes

| 项 目                 | 方案 1:<br>MBBR 工艺       | 方案 2:<br>氧化沟外新建缺氧池                         |
|---------------------|------------------------|--|
| 总池容/m <sup>3</sup>  | 49 015                 | 49 015 + 24 192                            |
| 新增占地/m <sup>2</sup> | 无需征地                   | 4 032,涉及征地                                 |
| 主要工程量               | 池内导墙的拆改、新增填料筛网等        | 新建缺氧池、氧化沟至缺氧区内回流管、污泥外回流管以及对现状进出水管的改造       |
| 主要设备                | 搅拌器、内回流泵、鼓风机           | 搅拌器、内回流泵、鼓风机                               |
| 改造难易程度              | 较简单,无需地基处理,需单池放空,无管道拆改 | 较复杂,需对新增用地进行地基处理,氧化沟无需放空,但需对现状地下管道拆改、避让、新建 |
| 能耗                  | 填料投资较高,能耗低             | 运行复杂,污水需在较远距离回流,能耗高                        |
| 投资估算/万元             | 2 500                  | 2 031(未包含地基处理、基坑支护、抗浮措施以及征地等费用)            |

从表 4 可看出,方案 1 占地面积较小,工程难度较低,运行方便,且可实现改造期间不影响污水厂的正常运行,因此设计选择方案 1(MBBR)。

3.3 工程设计方案

3.3.1 在池内重新构建缺氧、好氧区

根据 Carrousel 2000 型氧化沟的池型特点:污水在氧化沟内呈完全混合状态,随着与表曝机的距离变化,处于好氧、缺(厌)氧的交替环境,可实现同步硝化反硝化作用,但同步硝化反硝化作用与池内溶解氧(DO)扩散浓度、污泥絮体或颗粒污泥尺寸、温度等因素紧密关联,在该池型与功能区分布下尚无法准确控制,且无法通过经验或现有公式计算。

根据氧化沟的设计要求:保证在满足廊道内混合液中的污泥不发生淤积,沟底最后低流速不宜小于 0.3 m/s,一般渠道中混合液的流量是进水流量的 50~100 倍<sup>[2]</sup>,即需要在氧化沟内形成具有一定流速的“大循环”流态。本工程氧化沟内污水在曝



气机和推进器的提升和推动下,廊道内平均流速约  $0.5 \text{ m/s}$ ,则混合液的断面流量约为进水流量的 48 倍(即  $4800\% Q$ )。全池内的“大循环”流态无法形成工程核心目标所需要的独立、稳定的缺氧环境,也无法达到出水标准对 TN 的去除要求。在生物脱氮效率较高的 AAO 系列工艺中,池内断面流量仅为进水流量的  $5 \sim 6$  倍(考虑混合液内回流  $200\% Q \sim 300\% Q$ ,污泥回流  $80\% Q \sim 120\% Q$ )。

因此本工程氧化沟改造的核心工艺在于将氧化沟内的“大循环”流态与生物脱氮的“独立”缺氧区需求分立实现。

为达到上述目标,设计中在氧化沟内新建、拆除部分导墙,重新划分缺氧区(A、B、C)、好氧区(包含填料好氧区),构建了全新的池型与运行方式:

① 氧化沟池体高效利用:在重新构建的缺、好氧区内,利用氧化沟全部池容,形成多个小型 A、O 的“大串联”流态,即厌氧区→缺氧区 A→缺氧区 B→缺氧区 C→好氧填料区→好氧区的串联;

② 精确控制混合液回流:好氧区末端通过调整后的内回流泵精确控制内回流量,提高脱氮效率;

③ 独立的缺氧分区:通过导墙的构建,形成独立的缺氧区 B、缺氧区 C,其内部形成“小循环”流态,保证了缺氧区的独立、稳定,避免了高断面流量中 DO 等对缺氧环境的破坏;

④ 高效的好氧填料区域:导墙与拦截筛网使填料固定在池内特定功能区,使好氧区效率提高,相当于池体扩容,有效解决了厂区用地紧张的矛盾;

⑤ “小循环”抗冲击:循环流态保留了氧化沟抗水质冲击的特点。

改造后池内功能区划分及工艺措施见图 2。

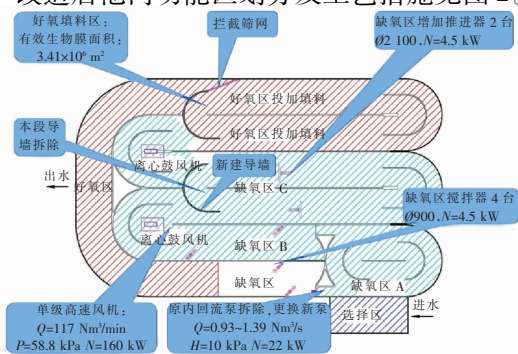


图 2 改造后氧化沟内功能区划分及主要工艺措施

Fig. 2 Division of functional district and the main technological measures in oxidation ditch after reconstruction

### 3.3.2 更改曝气方式

设计将氧化沟原有表面曝气改为底部曝气,以提高氧利用效率。

拆除原有倒伞表曝机(每池 4 台),在原有表曝机机位中的 2 个机位分别安装离心鼓风机,鼓风机设置在氧化沟顶部,并在沟底部根据功能需要安装曝气管路,可根据水质的浓度变化调整供气量。

### 3.3.3 独立分区内设置潜水推进器

为保证混合液不发生污泥淤积,在各个独立的“小循环”分区内设置潜水推进器。根据经验,推进器功率消耗按  $1.5 \sim 3.0 \text{ W/m}^3$  选型。

### 3.4 氧化沟改造后设计参数

氧化沟改造后参数:选择区容积为  $1815 \text{ m}^3$ ,停留时间为  $0.54 \text{ h}$ ;缺氧区容积为  $25404 \text{ m}^3$ ,停留时间为  $7.62 \text{ h}$ ,校核反硝化速率为  $0.032 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ;好氧区容积为  $21796 \text{ m}^3$ ,停留时间为  $6.54 \text{ h}$ ,有效生物膜面积为  $3.41 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。

主要设备:空气轴承单级鼓风机 4 台,  $Q=117 \text{ Nm}^3/\text{min}$ ,  $P=58.8 \text{ kPa}$ ,  $N=160 \text{ kW}$ ;内回流泵及起吊装置 2 台,  $Q=0.93 \sim 1.39 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H=10 \text{ kPa}$ ,  $N=22 \text{ kW}$ ;缺氧区推进器 4 台,  $D=2100 \text{ mm}$ ,  $N=4.50 \text{ kW}$ ;缺氧区搅拌机 8 台,  $D=900 \text{ mm}$ ,  $N=4.50 \text{ kW}$ ;缺氧区推进器(利旧)8 台,  $D=2.5 \text{ m}$ ,  $N=4 \text{ kW}$ ;选择区搅拌机(利旧)6 台,  $N=4 \text{ kW}$ ;内回流泵(利旧)2 台,  $Q=0.45 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $N=5.5 \text{ kW}$ 。

## 4 改造、调试过程

氧化沟改造工程按北池、南池分别进行。首先在停水清池后,拆除现有表曝机,在每池现有表曝机机位中的两个机位安装离心鼓风机。之后对池体进行土建改造及施工,并安装底部曝气管路系统、填料拦截筛网、推流器、搅拌器等设备。

氧化沟于 2014 年 6 月下旬—9 月底完成土建改造与设备安装,随后进行填料的投加与调试。由于本工程污水厂周边地区没有 MBBR 工艺运行的污水厂,无法获得已挂膜填料,需要在本厂氧化沟内投加填料进行培养。由于此时厂内对于工业废水的分质预处理工段尚未建成,因此氧化沟进水中混入的难生物降解工业废水对于池内活性污泥与生物膜的生长构成了较大冲击,生物膜生长缓慢,挂膜调试周期较长。

调试过程历经曝气系统清水调试、带负荷试车、分批次填料投加、生物膜驯化等过程。

## 5 运行效果与分析

对厂外工业废水超排进行管控后,2017 年 11 月—12 月,建设单位对改造后的氧化沟进行了为期 40 天的运行监测,结果如表 5 所示。在监测期间,污水厂处理水量日均值  $9.30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,是设计流量的 1.16 倍,共发生厂外进水超设计标准的水质冲击 4 次,水质超标 10% ~ 48%。经调整运行参数,系统在 1~2 天内能够恢复出水水质达标,具有较强的抗冲击性;进水水质在设计范围内时,氧化沟出水水质全部达到设计标准。

表 6 实际进、出水水质

Tab.6 Actual influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 项目  | COD   |      | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ |      | TN   |      | $\text{BOD}_5$ |     | TP  |      | SS    |      |
|-----|-------|------|----------------------------|------|------|------|----------------|-----|-----|------|-------|------|
|     | 进水    | 出水   | 进水                         | 出水   | 进水   | 出水   | 进水             | 出水  | 进水  | 出水   | 进水    | 出水   |
| 最大值 | 564.0 | 23.1 | 36.4                       | 3.4  | 46.5 | 14.7 | 202.0          | 5.0 | 6.8 | 0.6  | 196.0 | 12.0 |
| 最小值 | 128.3 | 9.6  | 11.9                       | 0.01 | 14.1 | 2.4  | 75.0           | 1.4 | 0.6 | 0.01 | 96.0  | 5.0  |
| 平均值 | 293.3 | 14.0 | 21.8                       | 0.3  | 31.8 | 6.6  | 118.0          | 2.9 | 3.9 | 0.1  | 150.2 | 6.7  |
| 85% | 371.1 | 16.3 | 26.7                       | 0.4  | 38.4 | 8.4  | 140.2          | 4.0 | 4.9 | 0.2  | 178.7 | 7.8  |

## 6 工程总投资及运行成本

本工程氧化沟 MBBR 改造工程总投资约 2 398 万元,主要为设备费用,包括空气轴承单级高速鼓风机、内回流泵及起吊装置、缺氧区推进器、搅拌器、填料、拦截筛网及曝气系统。

在工程运行改造后,氧化沟处理能力得到较大提升。由于进水水质中内碳源( $\text{BOD}_5$ )能够满足生物脱氮需求,无需外加碳源,因此运行成本主要由电耗构成。改造前氧化沟吨水电耗为  $0.26 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,电费为  $0.17 \text{ 元}/\text{m}^3$ [电价按  $0.66 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  计];改造后吨水电耗为  $0.17 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,电费为  $0.11 \text{ 元}/\text{m}^3$ ,运行电耗下降 35% 左右。电耗的降低主要源于曝气系统效率的提高和布置的优化。

## 7 结语

本工程在提标改造中,将 MBBR 工艺用于氧化沟改造,对氧化沟内流态及功能区进行重新划分,以强化硝化与反硝化功能,并将表面曝气改为底部曝气,提高了污水中碳源利用率和氧气的利用效率,从而降低用电消耗,运行成本降低约  $0.06 \text{ 元}/\text{m}^3$ ,年均节约运行费用 175 万元。

经工程运行,证明该工艺方案能够有效提高对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  与 TN 的去除效率,并具有较强的抗冲击与快速恢复能力,在处理规模不变的情况下,出水水质大幅提升,稳定达到 GB 18918—2002 一级 A 标准。

表 5 改造后氧化沟实际进、出水水质

Tab.5 Actual influent and effluent quality of oxidation ditch after reconstruction

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 项目  | COD   |      | 氨氮   |      | 总氮   |      |
|-----|-------|------|------|------|------|------|
|     | 进水    | 出水   | 进水   | 出水   | 进水   | 出水   |
| 最大值 | 805.7 | 58.4 | 64.9 | 18.7 | 81.5 | 30.4 |
| 最小值 | 186.6 | 19.1 | 14.5 | 0.2  | 24.7 | 3.5  |
| 平均值 | 462.1 | 38.8 | 32.1 | 4.3  | 43.2 | 10.2 |
| 85% | 632.5 | 47.0 | 43.7 | 7.9  | 51.5 | 12.6 |

2018 年 9 月本工程完成竣工验收,10 月—12 月进、出水水质见表 6,可见出水水质全部达标。

## 参考文献:

- [1] 周雹. 活性污泥工艺简明原理及设计计算[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.  
Zhou Bao. Simplified Principle and Design Calculation of Activated Sludge Process [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2005(in Chinese).
- [2] 区岳州,胡勇有. 氧化沟污水处理技术及工程实例[M]. 北京:化学工业出版社,2005.  
Ou Yuezhou, Hu Yongyou. Oxidation Ditch Sewage Treatment Technology and Engineering Cases [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2005(in Chinese).



作者简介:王晓康(1984—),男,天津人,大学本科,工程师,主要从事市政给水与排水工程的设计、工业污水处理工程设计工作。

E-mail:wangxiaokang\_2006@126.com

收稿日期:2019-06-03